

Las reacciones de fusión son las que aportan energía al Sol y las estrellas. En las reacciones de fusión, núcleos ligeros se combinan o fusionan, para formar núcleos más pesados. El proceso de fusión convierte la masa (m) en energía (E), tal y como en la fórmula de Einstein, $E=mc^2$. En el Sol, una serie de reacciones de fusión, la cadena p-p, empieza con protones, los núcleos del hidrógeno común, y termina produciendo partículas alfa que son los núcleos del helio. La cadena p-p genera la casi totalidad de la energía del Sol, y lo seguirá haciendo durante miles de millones de años.

La Fusión

Física de una fuente de energía fundamental

FUENTES Y CONVERSIONES DE ENERGÍA

VISIÓN DE CONJUNTO DE LOS PROCESOS DE CONVERSIÓN

Existen numerosas formas de energía y distintos procesos permiten pasar de una a otra. Aunque la energía total se conserve, en la mayoría de estas transformaciones la parte de energía utilizable se reduce.



Parámetros físicos de las reacciones exotérmicas

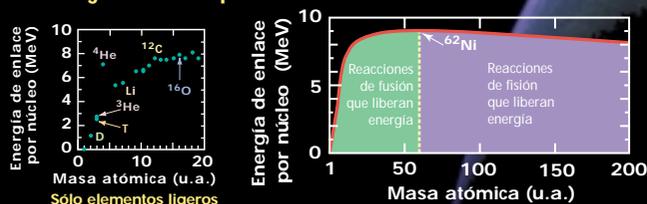
Tipos de reacciones:	químicas	fisión	fusión
Ejemplos	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$1n + {}^{235}U \Rightarrow {}^{143}Ba + {}^{91}Kr + 21n$	$D ({}^2H) + T ({}^3H) \Rightarrow 4He + 1n$
Combustibles (para una central)	Carbón y Aire	UO_2 (3% ${}^{235}U$ + 97% ${}^{238}U$)	Deuterio y Litio
Temperatura típica (K)	1000	1000	100 000 000
Energía generada por kg de combustible (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

COMO FUNCIONAN LAS REACCIONES DE FUSIÓN

FÍSICA NUCLEAR DE LA FUSIÓN

La fusión de elementos ligeros (con masa atómica baja) así como la fisión de elementos pesados (con masa atómica alta) desprenden energía.

Energía de enlace por nucleón en función de la masa nuclear



Energía de la reacción nuclear: $\Delta E = k (m_i - m_f) c^2$

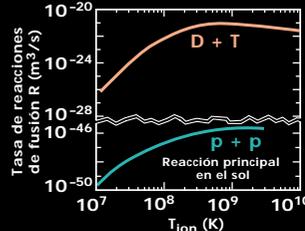
Según la fórmula de Einstein, $E = mc^2$. ΔE = energía liberada por reacción; m_i = masa inicial (total) de los reactivos; m_f = masa final (total) de los productos. El factor de conversión k vale 1 en unidades S.I., o 931,466 MeV/(u.a.) c^2 , si E se expresa en MeV y m es la masa en unidades atómicas (u.a.).

Masas nucleares

(La masa del electrón es de 0.000549 u.a.)

Símbolo	Partícula	Masa (u.a.)
n (1n)	Neutrón	1,008665
p (1H)	Protón	1,007276
D (2H)	Deuterón	2,013553
T (3H)	Tritón	3,015500
3He	Helio-3	3,014932
α (4He)	Helio-4	4,001506

Tasa de reacciones de fusión



Número de reacciones por unidad de volumen y de tiempo = $R n_1 n_2$

n_1, n_2 = densidades de los reactivos (iones/m³); R = tasa de reacciones (m³/s).

Multiplicar por ΔE para obtener la densidad de potencia liberada.

DOS REACCIONES DE FUSIÓN IMPORTANTES

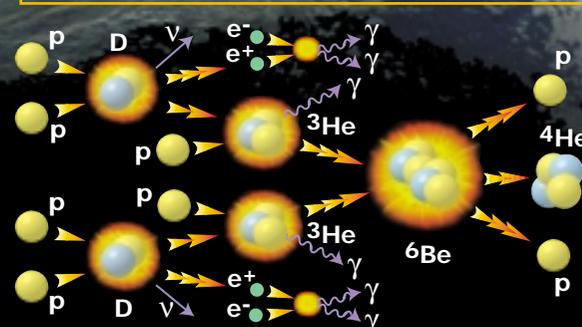


Para reactores de fusión de la primera generación



1 eV = 1,6022 x 10⁻¹⁹ J. La energía media de las partículas de 1 eV corresponde a una temperatura de 11600 K.

"p-p": EL CICLO DEL SOL



CREANDO LAS CONDICIONES DE LA FUSIÓN

CALENTAMIENTO Y CONFINAMIENTO DEL PLASMA

Confinamiento:

Para liberar una energía considerable, la fusión requiere plasmas de alta temperatura confinados con densidades altas durante un tiempo lo suficientemente largo.

Abanico de valores típicos:

- Compresión
- Energía de los productos de fusión

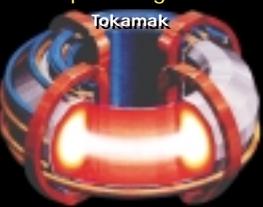
Mecanismos de calentamiento:

Gravedad



<----- Dimensiones: 10¹⁹ m ----->
Tiempos de vida del plasma: 10¹⁵ - 10¹⁸ s

Campos magnéticos



<----- Dimensiones: 10 m ----->
Tiempos de vida del plasma: 10⁻² - 10⁶ s

Inercia



<----- Dimensiones: 10⁻¹ m ----->
Tiempos de vida del plasma: 10⁻⁹ - 10⁻⁷ s

- Ondas electromagnéticas
- Calentamiento óhmico (electricidad)
- Inyección de neutros (haces de átomos de hidrógeno)
- Compresión
- Energía de los productos de fusión

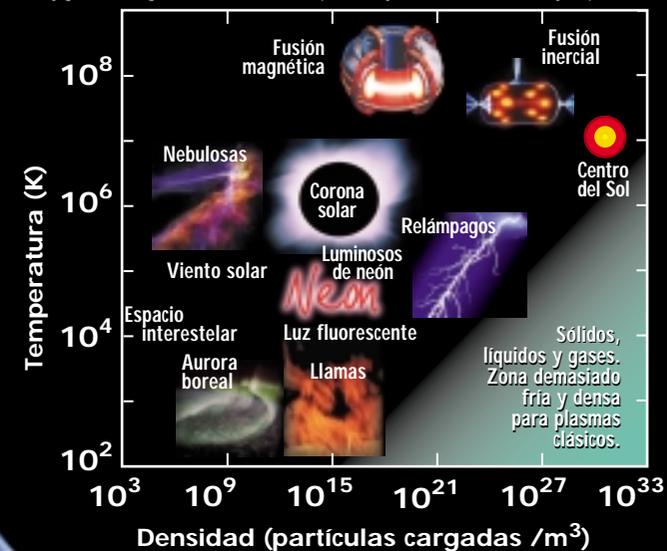
- Compresión (Implosión producida por láseres o haces de iones, o por rayos X producidos por láseres o haces iónicos)
- Energía de los productos de fusión

Para producir fusión en la Tierra, los átomos deben ser calentados a temperaturas muy elevadas, por encima de 10 millones de K. En este estado, con temperaturas tan elevadas, los átomos se ionizan formando un plasma. Para conseguir una ganancia neta de energía el plasma tiene que mantenerse unido (confinado) un tiempo lo suficientemente largo para permitir que tengan lugar muchas reacciones de fusión. Si se consigue construir en la práctica plantas eléctricas de fusión serán una fuente de energía prácticamente inagotable por la abundancia de los combustibles como el deuterio. Se han realizado progresos substanciales en esta dirección.

EL PLASMA CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

CARACTERÍSTICAS DE LOS PLASMAS MÁS REPRESENTATIVOS

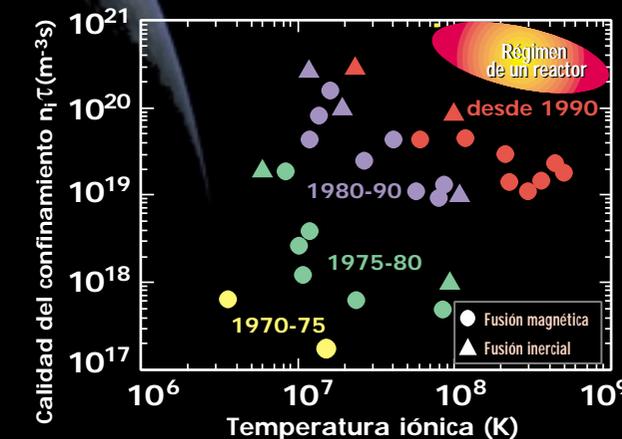
Los plasmas están formados por partículas cargadas, iones y electrones que se mueven libremente. Se producen a altas temperaturas, cuando los electrones pueden ser arrancados de los átomos. Los plasmas son muy frecuentes en la naturaleza. Por ejemplo, las estrellas son esencialmente plasmas. El plasma es el cuarto estado de la materia por su propiedades físicas, distintas de las de los sólidos, líquidos y gases. El rango de variación de las temperaturas y en las densidades es muy amplio



REALIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUSIÓN

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN EN FUSIÓN

Tanto en la vía de la fusión inercial como la magnética, los esfuerzos se concentran en la comprensión de los mecanismos de confinamiento y de calentamiento. El progreso en este campo se ve en el continuo aumento de los valores de la temperatura que se alcanzan para los iones, T_i , la densidad iónica, n_i , y el tiempo de confinamiento de la energía τ . Los futuros reactores de fusión deberán producir una potencia de aproximadamente 1 GW, con plasmas de $n_i \tau = 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ y temperatura iónica $T_i = 120$ millones K.



Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by CIEMAT Madrid and Forschungszentrum Jülich / TEC

El CPEP es una organización de profesores, físicos y educadores sin afán de lucro, con una participación importante de estudiantes. Los donativos privados y de sociedades, así como de los laboratorios nacionales han contribuido fuertemente al éxito de este proyecto. Este cartel ha sido creado por el CPEP con el apoyo de las siguientes organizaciones: la revista de la AIP, *Physics of Plasmas*, Division of Plasma Physics de la APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, U.S. Department of Energy, Trilateral Eurolog Cluster y Asociación Euratom-CIEMAT. Ilustraciones cedidas por: NASA, National Solar Observatory, Steve Albers y los organismos arriba citados.